

Approved For Release STAT
2009/08/19 :
CIA-RDP88-00904R000100120

Dec

Approved For Release
2009/08/19 :
CIA-RDP88-00904R000100120



Вторая Международная конференция
Организации Объединенных Наций
по применению атомной энергии
в мирных целях

A/CONF/15/P/2129
USSR
ORIGINAL: RUSSIAN

Не подлежит оглашению до официального сообщения на Конференции

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕАКТОРЫ НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ
В СОВЕТСКОМ СОЮЗЕ

А.И.Лейпунский, В.Г. Грабиц, Н.М. Аристархов,
И.И.Бондаренко, О.Д.Казачковский, О.И.Любимцев,
С.А.Пашков, М.С.Пинхасик, К.К.Ренне, Ю.Л.Стависский,
Ф.И.Украинцев, Л.Н.Усачев

§ I. В в е д е н и е

Изучение перспектив промышленного использования реакторов на быстрых нейтронах началось в Советском Союзе в 1949 г. Уже в это время можно было ожидать, что такие реакторы должны обладать большим значением коэффициента воспроизводства. Более благоприятные, чем в тепловых реакторах, условия для воспроизводства горючего определялись следующими обстоятельствами:

- а) уменьшением роли радиационного захвата в самом ядерном горючем;
- б) максимальным размножением нейтронов в U^{238} ;
- в) относительно меньшим паразитным захватом нейтронов в конструкционных и других материалах внутри активной зоны.

Произведенные оценки показывали, что величина коэффициента воспроизводства должна превышать единицу и, следовательно, применение реакторов на быстрых нейтронах может обеспечить переработку и использование для нужд атомной энергетики всего U^{238} .

Первоначально работы велись в двух направлениях:

- а) эскизная проработка различных вариантов промышленных атомных электростанций с реакторами на быстрых нейтронах;
- б) измерение необходимых физических констант и исследования

25 YEAR RE-REVIEW

-2-

по физике реакторов на быстрых нейтронах.

В 1950-51 гг. было выполнено эскизное проектирование реакторов на быстрых нейтронах разной мощности (вплоть до 1,5 млн квт по теплу) с применением различных теплоносителей (натрий, натрий-калий, свинец-висмут, гелий). Проектирование показало техническую осуществимость подобных систем. Наиболее перспективными оказывались системы, использующие в качестве теплоносителя жидкие щелочные металлы.

Одновременно была начата разработка теории и методов расчета реакторов на быстрых нейтронах. При этом были разработаны многогрупповые методы решения пространственно-энергетической задачи как в диффузионном, так и в более точных приближениях. Были также разработаны теория возмущений и кинетика подобных систем. Результаты проведенных расчетов были положены в основу проектирования промышленных и физических реакторов на быстрых нейтронах.

Основное внимание на первых этапах работы было уделено ядерно-физическим исследованиям с быстрыми нейтронами. Как известно, измерениям эффектов взаимодействия быстрых нейтронов с веществом (захват, деление) присущи специфические трудности. Эти трудности связаны, главным образом, со следующими обстоятельствами:

- а) сечения взаимодействия быстрых нейтронов с веществом, как правило, очень малы;
- б) эффекты от резонансных и тепловых нейтронов обычно на два-три порядка превышают эффекты от быстрых нейтронов.

Первое из указанных обстоятельств требует для проведения ряда основных измерений применения такого мощного источника нейтронов, как ядерный реактор. Второе обстоятельство исключает возможность использования для этой цели реактора на тепловых нейтронах, поскольку никакими борными фильтрами нельзя обеспечить снижение потока резонансных нейтронов в требуемой геометрии эксперимента до надлежащей величины.

Поэтому наряду с экспериментами на обычных источниках быстрых нейтронов (ускорительные трубки, фотонейтронные источники и проч.) было решено провести измерения с использованием физических реакторов на быстрых нейтронах. Кроме того, с помощью этих же установок должны были проводиться исследования по физике быстрых реакторов.

Физические реакторы на быстрых нейтронах БР-1 и БР-2 были

2867-53

-3-

сооружены и запущены: первый - в начале 1955 г., второй - в начале 1956 г.

§ 2. Реактор БР-I

Реактор предназначен для проведения исследований в различных нейтронных спектрах внутри активной зоны и отражателя, для изучения свойств систем на быстрых нейтронах, проверки теории быстрых реакторов. В реакторе не предусмотрено никакой принудительной системы теплоотвода. Максимальная мощность его, ограничиваемая условиями биологической защиты, составляет несколько десятков ватт. Нормальный уровень мощности, при котором производилось большинство измерений, равнялся нескольким ваттам.

Общий вид реактора приведен на рис. 1.

Активная зона собрана из плутониевых стержней, заключенных в герметичную оболочку из нержавеющей стали. Диаметр плутониевого стержня 10 мм, высота 130 мм. Внешний диаметр оболочки 10,8 мм. Кроме плутониевых стержней, в активной зоне находятся также холостые стержни из обедненного урана или других материалов диаметром 10,8 мм. Плутониевые и холостые стержни в сборке образуют приблизительно правильный цилиндр диаметром около 130 мм.

Активная зона окружена сменным цилиндрическим отражателем (экраном) высотой и диаметром 700 мм. Имеется несколько комплектов отражателя, в том числе из обедненного урана, меди и проч. Отражатель состоит из внешней (неподвижной) и внутренних (подвижных) частей. Снаружи к одной из сторон отражателя приставляется горизонтальная колонна (обычно из того же материала, что и отражатель), которая значительно увеличивает толщину экрана в одном направлении.

Регулирование аппарата производится движением внутренних подвижных частей отражателя. Всего имеется три органа регулирования: компенсирующий цилиндр (КЦ), вспомогательный компенсатор (ВК) и автоматический регулятор (АР). КЦ представляет собой цилиндр толщиной 13 мм,двигающийся в пространстве между двумя направляющими трубами - центральной и средней. КЦ может надвигаться снизу на активную зону, находящуюся внутри центральной трубы. ВК и АР движутся в наружном кольцевом зазоре между средней и внешней трубами. Толщина ВК и АР 20 мм. ВК занимает часть кольцевого зазора, соответствующую углу 120° , АР - углу 30° .

-4-

В состоянии максимальной реактивности все органы регулирования находятся в крайнем верхнем положении - на уровне верхнего края активной зоны. При опускании органов регулирования образуются полости в экране вблизи активной зоны, и отражательная способность экрана падает. Реактивность аппарата при этом уменьшается. Изменение реактивности ΔK , происходящее при опускании различных органов регулирования в крайнее нижнее положение, приведено в табл. I.

Таблица I

| Вид отражателя | $\Delta K \times 1000$ | | |
|----------------|------------------------|-----|-----|
| | КЦ | ВК | АР |
| Урановый | 36 | 11 | 3 |
| Медный | 25 | 7,5 | 1,8 |

Измерения ΔK производились в подкритическом режиме. При определении реактивности, соответствующей одному из органов регулирования, остальные находились в крайнем верхнем положении.

Подъем КЦ и ВК вверх не может производиться непрерывно. Специальная система шаговой подачи ограничивает время движения органов регулирования таким образом, что величина реактивности, вносимая за один шаг, не превышает $5 \cdot 10^{-4}$.

КЦ и ВК связаны с механическим приводом при помощи магнитного сцепления. В случае необходимости быстрой остановки реактора размыкаются цепи питания электромагнитов, и КЦ и ВК падают вниз под действием силы тяжести.

Разрыв цепей питания электромагнитов производится автоматически при поступлении аварийных сигналов от системы измерения мощности. Сброс органов регулирования может также производиться путем нажатия аварийных кнопок на пульте управления реактором.

Измерения мощности производятся с помощью трех пропорциональных счетчиков с BF_3 и ионизационной камеры с твердым борным слоем, расположенных на разных расстояниях вокруг реактора. Имеются специальные приспособления, позволяющие помещать счетчики и камеру в парафиновые или кадмиевые чехлы. Счетчики подключены к трем линейным усилителям и измерителям скорости счета. Интенсивность счета по каждому каналу измеряется стрелочным прибором,

289-55

-5-

расположенным на пульте управления. Показания одного из каналов, кроме того, непрерывно записываются на ленту. Поддержание мощности на заданном уровне в интервале от 0,05 до 100 Вт производится автоматически.

Все измерительные каналы, как импульсные, так и токовый, снабжены устройствами, дающими аварийные сигналы при превышении установленного уровня мощности, а также при одновременном выходе из строя двух (или трех) импульсных каналов. Время срабатывания (от поступления аварийного сигнала до начала падения КЦ или ВК) составляет около 0,02 сек. Следует отметить, что благодаря малым размерам реактора, при падении органов регулирования относительно большая отрицательная реактивность вносится очень быстро. Так, например, отрицательная реактивность, равная доле запаздывающих нейтронов $\beta = 0,002$, вносится при падении КЦ за 0,03 сек., при падении ВК за 0,1 сек.

Реактор размещается на специальном металлическом помосте в центре зала реактора (для уменьшения эффекта рассеяния от стен и пола). Стены и потолок зала сделаны из бетона и имеют достаточную толщину для обеспечения допустимого уровня излучения снаружи. Специальной защиты непосредственно вокруг реактора нет.

Для проведения экспериментов в активной зоне и отражателе имеются многочисленные каналы, в которые могут помещаться экспериментальные образцы или миниатюрные ионизационные камеры.

Реактор БР-I расположен в специальном отдельном здании. Кроме зала реактора и пультовой, в нем имеются еще помещения для подготовки экспериментов и другие лаборатории.

Основные особенности реактора БР-I

а) наличие многочисленных каналов,
 б) практически ничтожная активация вещества в активной зоне,
 в) отсутствие примыкающей к аппарату биологической защиты,
 г) отсутствие теплоносителя -
 обеспечивают удобный доступ внутрь реактора и позволяют легко и просто заменять любые компоненты активной зоны. Это делает его особенно хорошо приспособленным для работы по физике быстрых реакторов.

Кроме того, на реакторе БР-I весьма удобно производить исследования эффектов взаимодействия с веществом нейтронов различных

-6-

спектров: от самого жесткого, близкого к спектру деления внутри активной зоны, и до мягкого, равновесного спектра в экране.

§ 3. Реактор БР-2

1. Общее описание реактора

Реактор БР-2 предназначен для проведения ядерно-физических (а также материаловедческих) исследований при мощности до 100 квт в потоках быстрых нейтронов (до 10^{14} н/см² сек).

Активная зона реактора аналогична активной зоне БР-1. Она собрана из плутониевых стержней той же формы и тех же размеров, что и в БР-1. Кроме плутониевых стержней, в активной зоне имеются урановые стержни (из обедненного урана). Пространство между стержнями заполнено охлаждающей реактор ртутью.

Отражатель состоит из двух частей - неподвижной и подвижной. Неподвижная часть экрана (внешняя) набрана из урановых стержней диаметром 35 мм в оболочке из нержавеющей стали. В собранном виде неподвижный экран представляет собой цилиндр внешним диаметром и высотой 700 мм.

Подвижные внутренние части экрана непосредственно примыкают к активной зоне. Они служат для целей регулирования и аварийной остановки реактора.

Урановый экран со всех сторон окружен медным слоем толщиной 150 мм.

Реактор с урановым экраном и медной оболочкой помещен внутри цилиндрического водяного бака. Толщина слоя воды в баке 500 мм. За водяным слоем следует чугунный слой толщиной 400 мм. Последний слой защиты толщиной 1100 мм выполнен из тяжелого бетона, содержащего лимонит (средняя плотность бетона 4,2).

При проектировании защиты учитывались следующие основные требования:

а) защита должна обеспечивать снижение уровня излучения в зале реактора до величины порядка космического фона, т.е. примерно в 100 + 200 раз ниже обычной биологической дозы излучения.

б) Толщина защиты должна быть минимальной с целью повышения интенсивности нейтронных пучков, выводимых наружу.

Внешний диаметр аппарата вместе с защитой равен 5 м.

2. Система управления и аварийной остановки

Регулирование реактора осуществляется, как уже указывалось, передвижением внутренних подвижных частей отражателя, которые сделаны аналогично органам регулирования на реакторе БР-I с не-большими изменениями в размерах. Однако в качестве материала органов регулирования для улучшения условий теплосъема здесь использован не уран, а сплав никеля с медью.

В состоянии максимальной реактивности все органы регулирования находятся на уровне активной зоны (крайнее верхнее положение). При опускании органов управления в крайнее положение (нижнее) реактивность уменьшается на величины, указанные в табл. 2.

Таблица 2.

| | КЦ | ВК | АР |
|------------------------|----|-----|-----|
| $\Delta K \times 1000$ | 33 | 8,7 | 1,6 |

Приведенные значения измерены в подкритическом состоянии, в условиях, когда все остальные органы регулирования (кроме исследовавшегося) находятся в крайнем верхнем положении. Эффект влияния одних органов управления на реактивность, вносимую другими, в самом худшем случае не превосходит 10%.

Кривые удельной реактивности имеют такой же характер, как и для случая БР-I. Максимум наибольшей удельной реактивности находится несколько выше центральной плоскости.

Так же, как и на БР-I, КЦ и ВК соединены с механическими приводами посредством электромагнитов. При поступлении аварийного сигнала от аппаратуры, регистрирующей мощность реактора, или от приборов теплотехнического тракта, цепи, питающие магниты, размыкаются, и КЦ и ВК падают вниз под собственной тяжестью. Время изменения реактивности на величину, соответствующую доле запаздывающих нейтронов, при падении КЦ 0,03 сек., при падении ВК 0,1 сек.

Так же, как и на БР-I, используется шаговая подача при перемещении КЦ и ВК вверх.

Измерительные камеры расположены в специальных каналах внутри водяного бака в области максимальной плотности тепловых нейтронов (вблизи внутренней стенки бака).

-8-

Специальные кадмиевые чехлы, которые могут надвигаться (с помощью дистанционного привода) на камеры, позволяют изменять чувствительность каждого канала. Для измерения мощности при запуске реактора применяются пусковые счетчики с выходом на измерители скорости счета. Счетчики также размещены в каналах водяного бака. Каналы пусковых счетчиков окружены свинцом для защиты от γ -фона.

3. Система теплосъема

Теплоотвод из активной зоны осуществляется ртутью. Ртуть не является перспективным теплоносителем для энергетических реакторов. Она обладает заметным сечением захвата на быстрых нейтронах, большим сечением неупругого рассеяния. Теплопроводность ртути значительно хуже, чем у ряда других возможных теплоносителей. Ртуть обладает сравнительно высокой коррозионной активностью как по отношению к урану или плутонию, так и по отношению к некоторым конструкционным материалам (в особенности при высоких температурах). Наконец, пары ртути сильно токсичны.

Выбор ртути в качестве теплоносителя для БР-2 связан, с одной стороны, с невозможностью использования для этой цели воды, обладающей сильным эффектом замедления нейтронов, а с другой стороны, полное отсутствие (к моменту начала сооружения аппарата) опыта работы с натрием и с эвтектикой натрий-калий, не позволило применить эти наиболее подходящие для быстрых реакторов теплоносители. Не было никаких данных по коррозионной устойчивости конструкционных материалов в этих средах. Вызывала большие опасения возможность реакции натрия или калия с водой в случае неплотностей в контуре, в особенности в теплообменнике с водой.

В то же время для поставленной задачи создания экспериментального физического реактора на быстрых нейтронах небольшой мощности (по сравнению с промышленными), рассчитанного на невысокие температуры, ртуть, вообще говоря, являлась удовлетворительным теплоносителем. Некоторую роль сыграло также то обстоятельство, что в Советском Союзе уже имелся опыт работы со ртутью.

Циркулирующая по контуру ртуть нагревается в активной зоне и затем отдает тепло проточной воде в теплообменнике. Далее ртуть поступает в насос и направляется снова в активную зону. Направле-

-9-

ние потока теплоносителя в активной зоне из конструктивных соображений принято сверху вниз.

Скорость ртути в активной зоне 0,65 м/сек. Подогрев ртути при номинальной мощности (100 квт) составляет 30°C. Входная температура определяется температурой и скоростью воды, проходящей через теплообменник.

На случай выхода из строя насоса для съема остаточного тепловыделения имеется второй контур, параллельный первому. Во втором контуре насоса нет, и циркуляция ртути обеспечивается за счет естественной конвекции. Этот контур может работать также и в случае отключения источников электропитания. При переходе к режиму естественной циркуляции направление потока в активной зоне меняется на обратное, т.е. снизу вверх. Контур естественной циркуляции обеспечивает съем тепловыделения порядка 10 квт без перегрева активной зоны. Это примерно соответствует остаточной мощности, выделяющейся через 30 сек. после остановки реактора.

Съем тепла в течение первой минуты, когда требуется большой расход теплоносителя, обеспечивается автоматически благодаря специальному устройству технологической схемы. Это устройство включает в себя напорный бак, через который проходит ртуть из насоса по пути к активной зоне, и обратный клапан на выходе из насоса.

Экран реактора и органы регулирования охлаждаются воздухом. Воздух прокачивается через аппарат с помощью воздуходувки и выбрасывается в трубу. Расход воздуха 6 тыс. куб. м. в час. Общее количество тепла, выделяемое в экране при работе на номинальной мощности, составляет 25 квт.

На случай выхода из строя основной воздуходувки или отключения источников электропитания имеется вторая (малой производительности), рассчитанная на снятие остаточного тепловыделения.

Обе воздуходувки по технологической схеме находятся после реактора. Таким образом, внутри аппарата создается разрежение, чем обеспечивается невозможность протечек активированного воздуха в зал реактора.

4. Экспериментальные устройства

Аппарат снабжен большим количеством экспериментальных устройств, приспособленных для измерений как внутри реактора, так и вне его.

-10-

Центральный канал диаметром 8 мм вертикально проходит по оси симметрии через всю активную зону и торцевые экраны. Этот канал позволяет облучать образцы в максимальном потоке нейтронов 10^{14} н/см²сек в центре реактора.

Два канала в экране диаметром по 20 мм на разных расстояниях от центра дают возможность проводить исследования в более мягких нейтронных спектрах. Эти спектры больше соответствуют энергиям нейтронов в промышленных быстрых реакторах, чем спектр внутри активной зоны.

Непосредственно под активной зоной в центральной трубе, по которой проходит ртуть, помещены экспериментальные урановые образцы. Эти образцы предназначены для измерений сечений радиационного захвата быстрых нейтронов в плутонии.

Внутри активной зоны помещаются образцы, предназначенные для облучения в интенсивных потоках быстрых нейтронов. Эти образцы находятся в герметически закрытых трубках из нержавеющей стали, по форме и размерам совпадающих с оболочками плутониевых или урановых элементов. Подобные трубки ("материаловедческие элементы") могут помещаться на место любого элемента в активной зоне. Следует отметить, что реактор БР-2 является одним из совершенных и удобных устройств для производства экспериментов по влиянию облучения на вещество. Интенсивный поток быстрых нейтронов порядка 10^{14} н/см² сек представляет большой интерес с точки зрения проведения подобных испытаний в чистой постановке опыта.

К одной из сторон отражателя БР-2 примыкает графитовая тепловая колонна длиной 3000 мм. В тепловой колонне имеется ряд горизонтальных и вертикальных каналов, позволяющих производить измерения в различных нейтронных полях. Наличие тепловой колонны дает возможность при исследованиях с быстрыми нейтронами относить полученные результаты к сечениям на тепловых нейтронах, т.е. легко и надежно производить калибровку измерений.

С помощью горизонтальных каналов, перекрываемых шиберами, пучки быстрых нейтронов можно выводить наружу. Два горизонтальных канала доходят до границы активной зоны. Нейтронные пучки в этих каналах обладают жестким спектром, близким к спектру активной зоны. Один канал, доходящий только до отражателя, позволяет получать пучок с более мягким спектром. Несколько каналов позволяют выпускать наружу пучки тепловых нейтронов из тепловой колонны

-II-

(различной интенсивности и с различным кадмиевым отношением).

Зал реактора просторен и удобен для производства измерений на пучках в условиях минимального фона рассеянного излучения. Горизонтальные пучки проходят на расстоянии 1700 мм от пола. В стенах зала для двух самых интенсивных пучков, выходящих из активной зоны, устроены нейтронные ловушки.

5. Размещение реактора

Реактор размещен в отдельном специально построенном здании. Все элементы технологической схемы (насосы, воздуходувки, теплообменники и проч.) находятся в отдельных помещениях вне зала реактора. Центральный пульт управления реактором находится в специальном пультовом помещении. На центральный пульт управления вынесены показания всех основных приборов, измеряющих мощность реактора и контролирующих параметры технологического тракта.

В здании реактора имеются многочисленные комнаты для подготовки и проведения ядерно-физических измерений. В специальном помещении установлен манипулятор для дистанционной обработки облученных образцов и для предварительных работ по исследованию отработавших элементов.

6. Итоги работы реактора

На реакторе БР-2, обладавшем достаточно высоким потоком быстрых нейтронов, проводились исследования эффектов, которым соответствовали малые сечения взаимодействия. С помощью выведенных из аппарата пучков быстрых нейтронов производились исследования процесса деления, а также эффектов упругого и неупругого рассеяния. Кроме того, на реакторе проводились эксперименты по воздействию облучения на материалы.

Реактор БР-2 дал возможность получить некоторый опыт работы с жидкометаллическим теплоносителем, исследовать особенности эксплуатации реактора на быстрых нейтронах с теплосъемом, провести изучение влияния температуры на реактивность реактора и проч. Реактор работал как в условиях отрицательного, так и положительного статического температурного коэффициента (в зависимости от выбранных рабочих режимов). Каких-либо отклонений от стабильности никогда не наблюдалось. Эксплуатация реактора показала, что он

-12-

не менее прост и надежен в работе, чем обычный реактор на тепловых нейтронах.

После выполнения намеченной программы исследований реактор БР-2 был демонтирован.

§ 4. Коэффициент воспроизводства

Ряд основных физических измерений, выполненных с помощью реакторов БР-1 и БР-2, описаны в докладе (1). Весьма большое значение имеют те измерения, в которых производилось экспериментальное определение величины коэффициента воспроизводства.

Коэффициент воспроизводства для реактора БР-1 (с пересчетом на достаточно толстый урановый отражатель) оказался равным:

$$KB = 2,5 \pm 0,2.$$

Соответствующая величина для реактора БР-2 составляет

$$KB = 2,1 \pm 0,3.$$

Полученные результаты по своей величине превзошли все прежние, даже, казалось, сильно оптимистические ожидания. Однако эти данные сами по себе еще не дают однозначного ответа на вопрос о величине коэффициента воспроизводства в реальных промышленных системах. Наличие большого количества конструкционных материалов и теплоносителя в последних обязательно приводит к потерям в коэффициенте воспроизводства как за счет непосредственного захвата нейтронов, так и из-за смягчения нейтронного спектра при неупругом и упругом рассеянии.

Данные, необходимые для пересчета коэффициента воспроизводства применительно к промышленным системам, были получены в измерениях как на спектрах обоих физических реакторов, так и на монохроматических нейтронах. Изучалась зависимость средних чисел вторичных нейтронов на акт захвата и акт деления от энергии, вызывающей деления нейтронов (см. доклады (2), (3)). Большое внимание уделялось измерениям сечений радиационного захвата для материалов, которые могли быть использованы в реакторе. Были разработаны специальные методики, позволившие провести измерения как с активирующимися изотопами, так и с неактивирующимися. Некоторые результаты этих измерений приводятся в докладе (4).

Были проведены исследования эффектов неупругого рассеяния, а также изучение равновесных спектров нейтронов в различных средах.

55-2987

-13-

На основании данных, полученных в этих исследованиях, а также в других советских и зарубежных работах, были составлены системы констант (I), необходимые для расчета коэффициента воспроизводства в промышленных реакторах на быстрых нейтронах различных типов.

Расчеты показали, что для большинства вариантов промышленных систем на быстрых нейтронах коэффициент воспроизводства уверенно остается больше единицы. В качестве примера в табл. 3 приводятся значения коэффициента воспроизводства для некоторых из рассматривавшихся систем.

Таблица 3

| Система | Мощность по теплу, млн.квт. | Состав топливного элемента | Критическая масса, | Коэффициент кг воспроизводства |
|---------|-----------------------------|----------------------------|--------------------|--------------------------------|
| БН-50 | 0,2 | $Pu^{239} + U^{238}$ | 200 | 1,9 |
| " | 0,2 | $Pu^{239} + Ba$ | 230 | 1,8 |
| БН-250 | 1,0 | $Pu^{239} + U^{238}$ | 580 | 1,9 |
| " | 1,0 | $Pu^{239} + Ba$ | 530 | 1,6 |

Таким образом, основная задача, стоявшая на первом этапе работ, была решена. Было показано, что в реальных промышленных системах можно уверенно достигнуть коэффициента воспроизводства, существенно превышающего единицу.

§ 5. Преимущества и недостатки промышленных реакторов на быстрых нейтронах

В настоящее время на первом плане оказываются уже не физические, а инженерно-экономические вопросы.

Технико-экономические характеристики атомной электростанции на быстрых нейтронах существенно отличаются от станции на тепловых нейтронах. Это определяется рядом особенностей взаимодействия быстрых нейтронов с веществом, из них основными:

1. Сечения деления ядер горючего на быстрых нейтронах в сотни раз меньше, чем на тепловых нейтронах.

2. Отношение сечения деления для ядер горючего к сечению радиационного захвата в ядрах сырья U^{238} на быстрых нейтронах в 10-20 раз меньше, чем на тепловых нейтронах.

-14-

3. Сильные поглотители, т.е. вещества с большим сечением радиационного захвата нейтронов, отсутствуют.

4. Сечения радиационного захвата быстрых нейтронов осколками деления малы по сравнению с сечениями деления ядер горючего.

5. Pu^{240} имеет значительное сечение деления на спектре нейтронов активной зоны быстрого реактора.

Из вышеуказанного следует, что критическая масса реактора на быстрых нейтронах должна быть существенно больше критической массы реактора на тепловых нейтронах. В этих условиях особое значение приобретает требование достижения максимальной плотности тепловыделения. Большая плотность тепловыделения и, следовательно, интенсивный теплосъем в реакторах на быстрых нейтронах совершенно необходимы, иначе потребуются весьма значительные количества горючего для создания энергетических мощностей, имеющих промышленное значение.

Разработка различных вариантов систем на быстрых нейтронах в стадии эскизного проектирования показала, что возможно достижение удельного тепловыделения порядка 1000 квт с 1 кг горючего. Таким образом, в этом отношении реакторы на быстрых нейтронах проигрывают тепловым реакторам.

Быстрые реакторы однозначно требуют применения жидкометаллического охлаждения, поскольку вода и органические вещества непригодны по своим замедляющим свойствам, а газ - из-за невозможности достижения достаточно интенсивного теплосъема. Наиболее подходящими оказываются щелочные металлы и, прежде всего, натрий. Такие теплоносители, как эвтектика свинец-висмут или ртуть, уступают щелочным металлам как по теплотехническим, так и по ядерно-физическим свойствам. Таким образом, создание реакторов на быстрых нейтронах обязательно связано с использованием системы передачи тепла к воде (или другому рабочему телу) при помощи жидкого натрия, что, учитывая большие масштабы установок, вызывает известные технические трудности.

Относительная малость сечения деления приводит к необходимости применения урана с большим обогащением (если в качестве горючего используется U^{235}). Если используется смесь U^{238} с Pu , то концентрация последнего должна быть высокой (10% и выше). Это влечет за собой дополнительные потери горючего при

2862-55

-15-

химпереработке топливных элементов. Однако следует заметить, что при большой величине коэффициента воспроизводства эти потери оказываются незначительными.

Основным преимуществом реакторов на быстрых нейтронах является высокий коэффициент воспроизводства. Кроме того, имеется ряд других немаловажных достоинств подобных систем.

Отношение сечения радиационного захвата в конструкционных материалах к сечению деления горючего приблизительно одинаково для быстрых и тепловых нейтронов. Однако эффект конструкционных материалов в реакторах на быстрых нейтронах должен быть во много раз слабее, чем на тепловых нейтронах, благодаря большой концентрации горючего.

Из-за этого выбор конструкционных материалов для реакторов на быстрых нейтронах оказывается весьма широким. Этим самым открываются большие возможности для создания топливных элементов, хорошо отвечающих как условиям теплосъема, так и условиям химпереработки.

Следует ожидать, что относительные затраты на регенерацию активной зоны реактора на быстрых нейтронах будут меньше, чем для реактора на тепловых нейтронах. Это связано с тем, что длительность кампании реактора на быстрых нейтронах, по-видимому, будет больше, чем реактора на тепловых нейтронах. Последнее обуславливается как относительно меньшим влиянием осколков на реактивность (а также на коэффициент воспроизводства), так и хорошими возможностями для создания надежных топливных элементов за счет широкого выбора конструкционных материалов. Кроме того, отсутствие сильных поглотителей для быстрых нейтронов позволяет практически отказаться от ограничений по содержанию примесей в конструкционных материалах.

Еще одним преимуществом реакторов на быстрых нейтронах является возможность достижения больших концентраций накопленного горючего в урановом экране. По сути дела, эта концентрация практически будет определяться только оптимальными условиями химпереработки и во много раз будет превышать накопление плутония в реакторах на тепловых нейтронах. Следует добавить, что соотношения в сечениях радиационного захвата в U^{238} и деления таковы, что количество осколков при данной концентрации накопившегося плутония в быстром реакторе будет в десятки раз меньше, чем в тепловом

-16-

реакторе. Таким образом, стоимость извлечения плутония из облученного урана в реакторе на быстрых нейтронах должна быть во много раз меньше, чем в тепловом реакторе. Наконец, следует обратить внимание на то, что P_{240} будет выгорать в активной зоне реактора на быстрых нейтронах с заметной интенсивностью. Это равносильно эффективному повышению и без того уже хорошего коэффициента воспроизводства.

Влияние перечисленных выше факторов на экономику атомных электростанций на быстрых нейтронах нельзя учесть с достаточной точностью. Это делает ненадежными всякие экономические оценки эффективности подобных систем в настоящее время.

Перед исследователями, работающими в области реакторов на быстрых нейтронах, стоят сейчас инженерно-экономические вопросы. Каковы наиболее оптимальные типы реакторов на быстрых нейтронах? Как лучше всего преодолеть те технические трудности, которые связаны с созданием подобных систем? Какое место должны занимать реакторы на быстрых нейтронах в общей программе развития атомной энергетики?

Для получения ответов на интересующие нас вопросы в Советском Союзе будет сооружена опытная промышленная электростанция с реактором на быстрых нейтронах БН-50. Параметры этой станции приводятся в приложении I.

§ 6. Реактор БР-5

I. Назначение реактора

Переход с БР-2 к БН-50 не может быть осуществлен без промежуточного этапа сооружения экспериментального технологического реактора. Эксплуатация БР-2, естественно, не могла дать достаточного опыта и необходимых навыков, которые бы позволили сразу же приступить к сооружению БН-50. Переход непосредственно от маломощного аппарата с ртутным охлаждением, с потоком нейтронов 10^{14} н/см² сек к промышленной системе с натриевым охлаждением и потоком 10^{16} н/см² сек представлялся необоснованным. Поэтому было принято решение соорудить экспериментальный технологический реактор на быстрых нейтронах БР-5. В табл.4 для сравнения приводятся некоторые параметры трех реакторов:

2862-51

-17-

Таблица 4

| Наименование параметра | Наименование реактора | | |
|--|-----------------------|-----------|-----------|
| | БР-2 | БР-5 | БР-50 |
| Мощность по теплу, кВт | 100 | 5000 | 200 000 |
| Поток нейтронов, н/см ² сек | 10^{14} | 10^{15} | 10^{16} |
| Максимальная плотность тепловыделения в а.з. кВт/л | 130 | 460 | 1 400 |
| Теплоноситель | <i>Hg</i> | <i>Na</i> | <i>Na</i> |
| Максимальная температура теплоносителя, °C | 60 | 500 | 500 |

Для сокращения сроков строительства и монтажа реактор БР-5 был сооружен на месте демонтированного реактора БР-2 с использованием некоторой части оборудования последнего.

Назначение реактора определяется следующими основными задачами:

- а) испытание топливных и экранных элементов для реактора БР-50;
- б) испытание отдельных узлов технологического оборудования, арматуры и приборов и получение опыта работы с радиоактивным натриевым теплоносителем;
- в) проведение ядерно-физических и материаловедческих исследований в интенсивных потоках быстрых нейтронов.

2. Общие принципы конструкции реактора

Конструкция реактора БР-5 и его основные параметры определялись из его целевого назначения. В качестве горючего в активной зоне выбрана окись плутония, применение которой вместо чистого металла определяется ее хорошей совместимостью с конструкционными материалами оболочек при высоких температурах и стойкостью в поле излучения. Эффект замедления нейтронов за счет присутствия кислорода в активной зоне является небольшим и, вообще говоря, играет полезную роль, поскольку приближает нейтронный спектр к спектру промышленной системы. Применение вместо окиси плутония

-18-

оксида урана ^{235}U привело бы из-за разницы в сечениях деления и величине ν к значительному росту критической массы и, соответственно, снижению интенсивности нейтронного потока при заданной величине общего теплосъема.

Так как реактор не предназначается для практического воспроизводства ядерного горючего, то применение урана в отражателе не является обязательным. Кроме того, использование урана в отражателе приводит к увеличению области интенсивного тепловыделения и появлению известных технических трудностей в осуществлении охлаждения. Поэтому в качестве материала отражателя был выбран никель, который обладает высоким альбедо для быстрых нейтронов и хорошей теплопроводностью. Только небольшая внутренняя часть отражателя была изготовлена из урана. Эта часть отражателя вместе с активной зоной размещена в центральной трубе и охлаждается жидким натрием. В такой конструкции внутренний отражатель выполняет роль тепловой защиты центральной трубы и обеспечивает возможность проведения ряда экспериментальных исследований. К числу их относятся эксперименты по накоплению плутония, необходимые для разработки промышленных методов химического выделения горючего из облученного урана. В установке БР-5 не предусматривается практического использования выделяемой энергии. Поэтому некоторое снижение средней температуры теплоносителя за счет внутреннего экрана не является существенным.

Наружный (никелевый) экран охлаждается воздухом, что позволяет удобно разметить в нем органы регулирования.

3. Активная зона и внутренний отражатель

В активной зоне находится 80 топливных пакетов. Каждый пакет представляет собой шестигранную трубку из нержавеющей стали, содержащую топливные элементы. Шестигранная трубка имеет толщину стенки 0,5 мм, наружный размер "под ключ" 26 мм. Внутри трубки, вблизи торцов сверху и снизу укреплены решетки, в которых устанавливаются топливные элементы, по 19 штук в каждом пакете. Снизу пакет заканчивается конусной насадкой, центрирующей его в соответствующем отверстии решетки активной зоны. В верхней части пакет заканчивается конусом с шейкой, приспособленной для захвата специальным перегрузочным механизмом.

Топливный элемент представляет собой трубку из стали IX18N9T,

-19-

заполненную брикетками спеченной окиси плутония. Внешний диаметр трубки 5 мм, толщина стенки 0,4 мм, длина активной части составляет 230 мм.

Для улучшения теплового контакта в трубке создается давление гелия в I ата. Зверху трубки имеется полость высотой 2-3 мм для компенсации температурных расширений. Сверху и снизу топливные элементы уплотняются пробками, которые привариваются к оболочке роликовой сваркой, и наконечниками, привариваемыми к оболочке и пробке путем аргоно-дуговой сварки.

Внутренний отражатель набирается из пакетов, идентичных по форме и размерам пакетам активной зоны, но вместо 19 топливных элементов в каждом пакете находится 7 урановых элементов.

Каждый урановый элемент состоит из двух стерженьков диаметром 7,6 мм и высотой 140 мм, заключенных в оболочку из нержавеющей стали 1X1819T диаметром 9x0,4 мм. Урановые стерженьки фиксируются внутри стальных трубок навитой на них молибденовой проволокой. Контактным заполнителем в урановом элементе является сплав 22% натрия и 78% калия. Подобно топливным элементам, урановые элементы уплотняются по торцам приварными пробками и наконечниками.

4. Система управления

Управление реактором БР-5 построено так же, как в реакторах БР-1 и БР-2, на принципе изменения реактивности системы за счет перемещения внутренних слоев никелевого экрана.

Исполнительными органами системы управления являются:

1. Цилиндрический слой отражателя толщиной 50 мм (компенсирующий цилиндр КЦ), расположенный сразу за кожухом центральной трубы. Вес КЦ составляет 187,4 кг;

2. Второй подвижной кольцевой слой никелевого отражателя, так называемый экраный компенсатор (ЭК), толщиной 100 мм, расположенный за первым. Вес ЭК составляет 705 кг;

3. Два стержня автоматических регуляторов (АР), перемещающиеся в пазах второго подвижного слоя. Размер стержней в сечении 140 x 50 мм.

Охлаждение органов регулирования осуществляется воздухом, проходящим в зазорах между подвижными и неподвижными деталями отражателя. Полная реактивность, вносимая каждым из органов регулирования, приводится в табл. 5.

-20-

Таблица 3

| | ИЦ | ЭК | ЛР |
|------------------------|----|----|-----|
| $\Delta K \times 1000$ | 63 | 28 | 0,9 |

В качестве чувствительных элементов используются 2 борных счетчика (при пуске аппарата) и одиннадцать ионизационных борных камер (в рабочем режиме).

Для регулирования чувствительности камер в соответствии с мощностью аппарата они снабжаются экранирующими цилиндрами из стали с борным покрытием, толщина которого линейно увеличивается по длине.

Датчики расположены на расстоянии 650 мм от центра аппарата в бачке водяной защиты. Автоматическое регулирование реактора производится одним из регуляторов, в то время как второй находится в состоянии готовности и включается в работу при отказе первого.

Компенсация выгорания, температурного эффекта и других значительных изменений реактивности достигается перемещением ИЦ и ЭК.

Аварийная остановка осуществляется одновременным сбросом ИЦ и ЭК. Энергия падающего ИЦ воспринимается и гасится пружинным компенсатором, энергия ЭК-гидротормозом.

5. Биологическая защита

Защита реактора ЛР-5 не претерпела больших изменений по сравнению с защитой ЛР-2, несмотря на увеличение мощности в 50 раз. Это объясняется тем, что защита реактора ЛР-2 рассчитывалась, исходя из 0,01 биологической дозы.

В целом биологическая защита аппарата ЛР-5 представляет собой следующее: боковая защита та же, что в ЛР-2; верхняя биологическая защита состоит из карбида бора (80 см), вращающихся стальных пробок (120 см) и верхней съемной пробки из парафина и железа толщиной 140 см; нижняя защита, состоящая из слоя воды в 20 см и слоя чугуна в 40 см, обеспечивает безопасную работу в боксе под аппаратом только при его остановке.

Технологическое оборудование и трубопроводы первого контура расположены в специальных защитных герметичных боксах, примыкающих к аппарату.

-2I-

6. Система теплосъема

Реактор рассчитан на работу при максимальной мощности в активной зоне 5000 квт. При этом в урановом отражателе выделяется 800 квт, а в никелевом 130 квт.

Съем тепла выделяющегося в активной зоне и урановом отражателе, осуществляется натрием, проходящим снизу вверх по центральной трубе аппарата.

По выходе натрий разделяется на 2 одинаковых потока, проходящих по трубопроводам диаметром 110 мм, к двум идентичным контурам. Каждый контур включает в себя теплообменник *Na-NaK* и циркуляционный насос, возвращающий натрий в центральную трубу. После разделения потока и перед его слиянием вмонтированы запорные вентили, позволяющие вести независимую работу с каждым из контуров в отдельности.

Трубопроводы первичного контура с натрием, проходящие вне герметичных боксов, окружены защитными чехлами, заполненными аргоном, предохраняющим радиоактивный натрий от контакта с атмосферным воздухом (в случае возникновения течей в основном тракте).

Герметичные боксы, в которых расположено технологическое оборудование первого контура, заполняются азотом. Наблюдение за работой оборудования, размещенного в этих боксах, производится с помощью телевизионных установок.

Теплоотвод от вторичных контуров *NaK* осуществляется двумя различными способами. В одном из контуров *NaK* установлен воздушный теплообменник, и тепло снимается потоком атмосферного воздуха, прокачиваемого вентилятором.

В другом контуре установлена испарительная установка и тепло от *NaK* идет на парообразование дистиллята, пар которого конденсируется в холодильнике с проточной водой.

-22-

Таблица 6

Основные параметры технологической схемы охлаждения
центральной части в нормальном режиме работы

| Система теплосъема | Наименование контура | Параметр | Размер- ность | Величи- на |
|---|---|---|---------------------|---------------|
| Контур с воздушным охлаждением, отводящий 50% мощ- ности | Контур натрия | Расход | м ³ /час | 130 |
| | | Температура вхо- да в центральную трубу | °C | 375 |
| | | Средняя температу- ра выхода из цен- тральной трубы | °C | 450 |
| | | Давление газовой подушки централь- ной трубы | ати | 0,08 |
| | Контур на- трий-калия | Расход | м ³ /час | 130 |
| | | Температура вхо- да в теплообмен- ник металл-металл | °C | 300 |
| | | Температура выхода из теплообменника металл-металл | °C | 430 |
| | Контур воз- духа | Расход | м ³ /час | 40 000 |
| | | Температура входа в теплообменник металл-воздух | °C | 5 -20 |
| Контур с во- дяным охлаж- дением, отво- дящий 50% мощности | Контур на- трия | См. параметры кон- тура натрия с воз- душным охлажде- нием | | |
| | Контур на- трий-калия | См. параметры кон- тура с воздушным охлаждением | | |
| | Испарительно- конденсацион- ная система | Давление в испа- рителе | ат | 16 |
| | | Расход техничес- кой воды в кон- денсаторе | м ³ /час | 70 |

-23-

Жидкометаллические контура аппарата снабжены ловушками для очистки теплоносителей от окислов.

Система охлаждения БР-5 обеспечивает необходимый теплоотвод в различных аварийных режимах.

В случае неисправности в одном из контуров теплосъем осуществляется вторым контуром, снимающим 50% мощности. При наиболее неприятном случае - выходе из строя энергосистемы - циркуляция *Na* и *NaK* обеспечивается в первые 40-60 сек. за счет инерции маховиков, которыми снабжены циркуляционные насосы. В дальнейшем теплоотвод осуществляется за счет естественной циркуляции теплоносителей.

7. Экспериментальные устройства

Аппарат БР-5 позволяет проводить широкую программу технологических и физических исследований. Во-первых, отдельные пакеты активной зоны и уранового отражателя, размещенные в центральной трубе, могут извлекаться и заменяться пакетами из опытных образцов тепловыделяющих элементов или образцов для материаловедческих исследований.

Эта возможность обеспечивается специальной системой эксцентрично вращающихся пробок, расположенных в верхней части центральной трубы и снабженных транспортно-разгрузочными приспособлениями. Во-вторых, аппарат снабжен экспериментальной петлей - отдельным контуром, позволяющим вводить исследуемые образцы в поток быстрых нейтронов порядка 10^{15} н/см²сек и организовать сепаратный теплосъем независимым теплоносителем мощности до 100 кВт при максимальной температуре $550 \pm 600^\circ\text{C}$ и скорости 9-11 м/сек.

Наконец, в-третьих, аппарат БР-5 имеет 4 канала, дающих пучки нейтронов различных энергий, и тепловую колонну. Данные этих устройств приводятся в табл. 7.

-24-

Таблица 7

| Наименование устройства | Наименование параметра | Величина н/см ² сек | Примечание |
|-------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|---|
| Пучок быстрых нейтронов | Максимальный поток на выходе | $6 \cdot 10^9$ | Аппарат имеет 2 таких пучка диаметром 40 мм |
| Пучок промежуточных нейтронов | То же | $5 \cdot 10^8$ | Диаметр пучка 40 мм |
| Пучок тепловых нейтронов | То же | $5 \cdot 10^7$ | " |
| Тепловая колонна | Максимальный поток тепловых нейтронов | $5 \cdot 10^{12}$ | Тепло отводится воздухом |

§ 7. В ы в о д н ы е

Перед инженерами и учеными, работающими над проблемой реакторов на быстрых нейтронах, стоит еще много трудностей. Ответ на основные технико-экономические вопросы даст сооружение и эксплуатация атомной электростанции на быстрых нейтронах БН-50.

Центральный агрегат станции, ее реактор, спроектирован таким образом, чтобы можно было легко менять состав и композицию активной зоны и экрана. Предполагается провести испытания компонент системы и, в первую очередь, топливных элементов различных типов.

Будут испытаны топливные элементы как на основе сплава плутония с ураном (а также обогащенного урана), так и на основе смеси плутония с разного рода инертными разбавителями типа железа, бария и т.п. Применение инертных разбавителей открывает более широкие возможности по созданию надежных топливных элементов, рассчитанных на большой удельный теплосъем и длительную работу (5). В то же время коэффициент воспроизводства за счет использования инертных разбавителей уменьшается не на много.

Следующим этапом развития проблемы в Советском Союзе явится сооружение типовой промышленной атомной электростанции на быстрых нейтронах БН-250 (см. приложение № 2). В настоящее время ведется эскизное проектирование этой станции. Строительство будет начато

2862-55

-25-

после пуска в эксплуатацию станции БН-50.

В заключение еще раз подчеркнем, что особенности атомных электростанций на быстрых нейтронах приводят к ряду факторов, влияющих на экономику подобных систем в различных направлениях. Эти факторы поддаются точному учету в настоящее время. Оценку рентабельности станций на быстрых нейтронах и их сравнение с системами на тепловых нейтронах можно будет сделать лишь после накопления достаточного опыта эксплуатации промышленных систем. Однако каковы бы ни были результаты подобных исследований, можно сейчас твердо говорить, по крайней мере, о двух несомненных преимуществах систем на быстрых нейтронах:

а) уверенное превышение коэффициента воспроизводства над единицей обеспечивает возможность переработки и использования для нужд ядерной энергетики всего U^{238} ;

б) облегчение условий регенерации активной зоны и извлечения накапливаемого плутония из экрана при высокой величине коэффициента воспроизводства создает возможности для удешевления получаемой электроэнергии.

Все это позволяет говорить о перспективности систем на быстрых нейтронах. Нет сомнения, что в ближайшем будущем подобные системы займут важное место в общей программе развития атомной энергетики.

Л и т е р а т у р а

1. Лейпунский А.И. и др. "Исследования по физике реакторов на быстрых нейтронах". Доклад, представленный советской делегацией на 2-ю Женевскую конференцию по мирному использованию атомной энергии
2. Андреев В.Н. "Измерение эф. плутония-239 и урана-235 для быстрых нейтронов". Доклад, представленный советской делегацией на 2-ю Женевскую конференцию по мирному использованию атомной энергии
3. Бондаренко И.И. "Среднее число и спектр вторичных нейтронов". Доклад, представленный советской делегацией на 2-ю Женевскую конференцию по мирному использованию атомной энергии
4. Лейпунский А.И. и др. "Измерение эффективных сечений радиационного захвата быстрых нейтронов". Доклад, представленный советской делегацией на 2-ю Женевскую конференцию по мирному использованию атомной энергии

5. Казачковский О.Д. "Экономика ядерного горючего в быстрых энергетических реакторах". Доклад, представленный советской делегацией на 2-ю Женевскую конференцию по мирному использованию атомной энергии

Приложение I

Основные параметры атомной электростанции на быстрых нейтронах БН-50

| | Размерность | Величина |
|---|-------------------------|-------------------|
| Электрическая мощность | квт | 50 000 |
| Диаметр активной зоны | см | 65 |
| Высота активной зоны | см | 65 |
| Толщина экрана | см | 60 |
| Средний тепловой поток в активной зоне | ккал/м ² час | $1,8 \cdot 10^6$ |
| Среднее удельное тепловыделение | квт/л а.з. | 800 |
| Теплоноситель | - | натрий |
| Общий расход натрия | м ³ /час | 3500 |
| Средняя скорость натрия в активной зоне | м/сек | 6 |
| Средняя температура натрия на выходе | °C | 480 |
| Температура пара | °C | 415 |
| Давление пара | кг/см ² | 29 |
| Максимальный поток нейтронов | н/см ² сек | $9 \cdot 10^{15}$ |
| Коэффициент воспроизводства | | 1,9 |
| Состав активной зоны (объемные доли) | | |
| теплоноситель | | 0,4 |
| топливные элементы | | 0,47 |
| конструктивные материалы | | 0,13 |

2862-55

-27-

Приложение 2

Предварительные параметры реактора атомной
электростанции на быстрых нейтронах БН-250

| | Размерность | Величина |
|---|-------------------------|----------------------|
| Электрическая мощность | кВт | 250 000 |
| Диаметр активной зоны | см | 107 |
| Высота активной зоны | см | 107 |
| Толщина экрана | см | 60 |
| Средний тепловой поток в активной зоне | ккал/м ² час | 2,5.10 ⁶ |
| Среднее удельное тепловыделение | кВт/л а.з. | 1 000 |
| Теплоноситель | | натрий |
| Средняя скорость натрия | м/сек | 9 |
| Средняя температура натрия на выходе | °C | 540 |
| Максимальный поток нейтронов | н/см ² сек | 1,3.10 ¹⁶ |
| Коэффициент воспроизводства | | 1,8 ± 2,0 |
| Состав активной зоны (объемные доли) | | |
| теплоноситель | | 0,44 |
| топливные элементы | | 0,43 |
| клинструкционные материалы | | 0,13 |

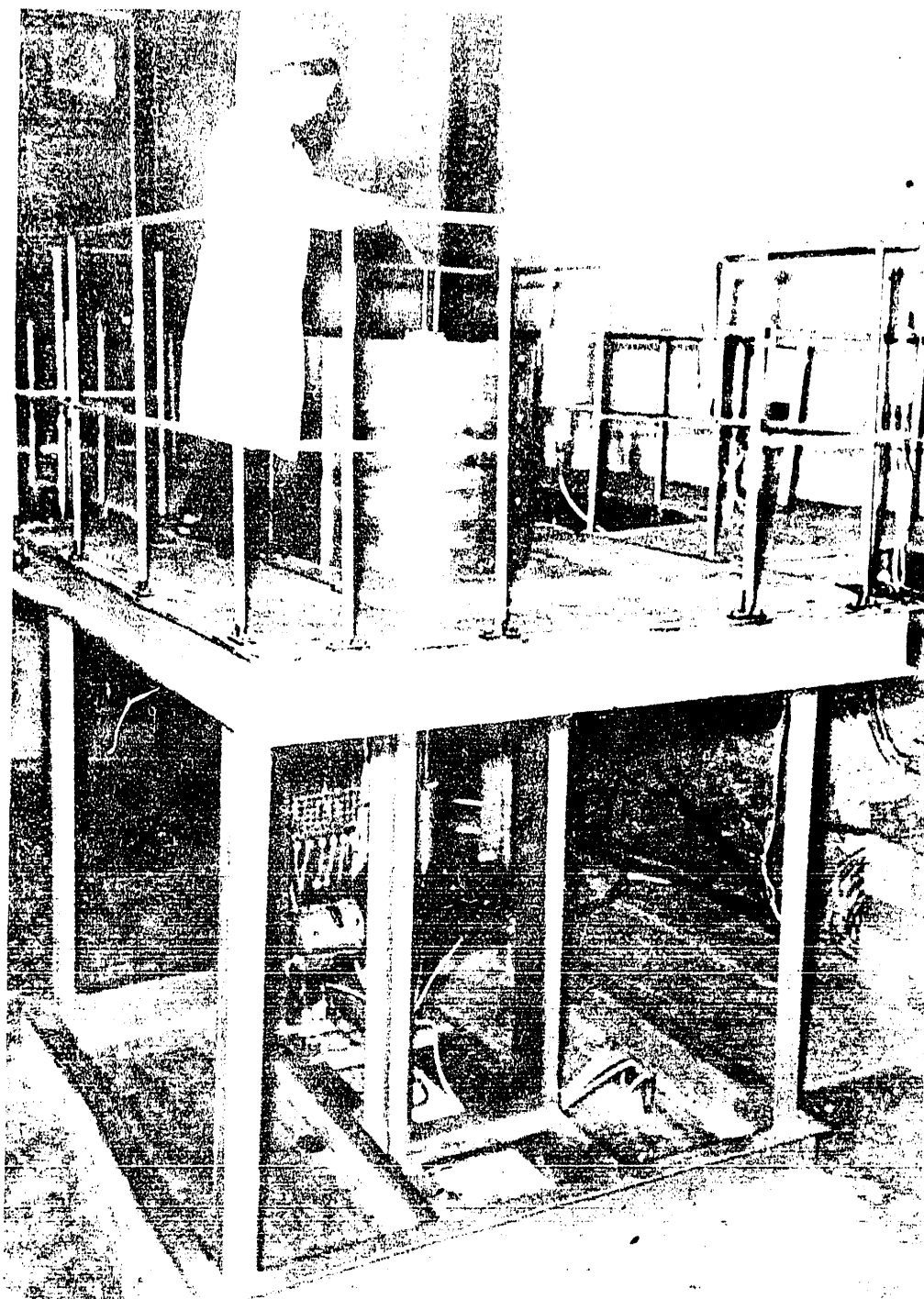


Рис.1. Общий вид реактора БР-I

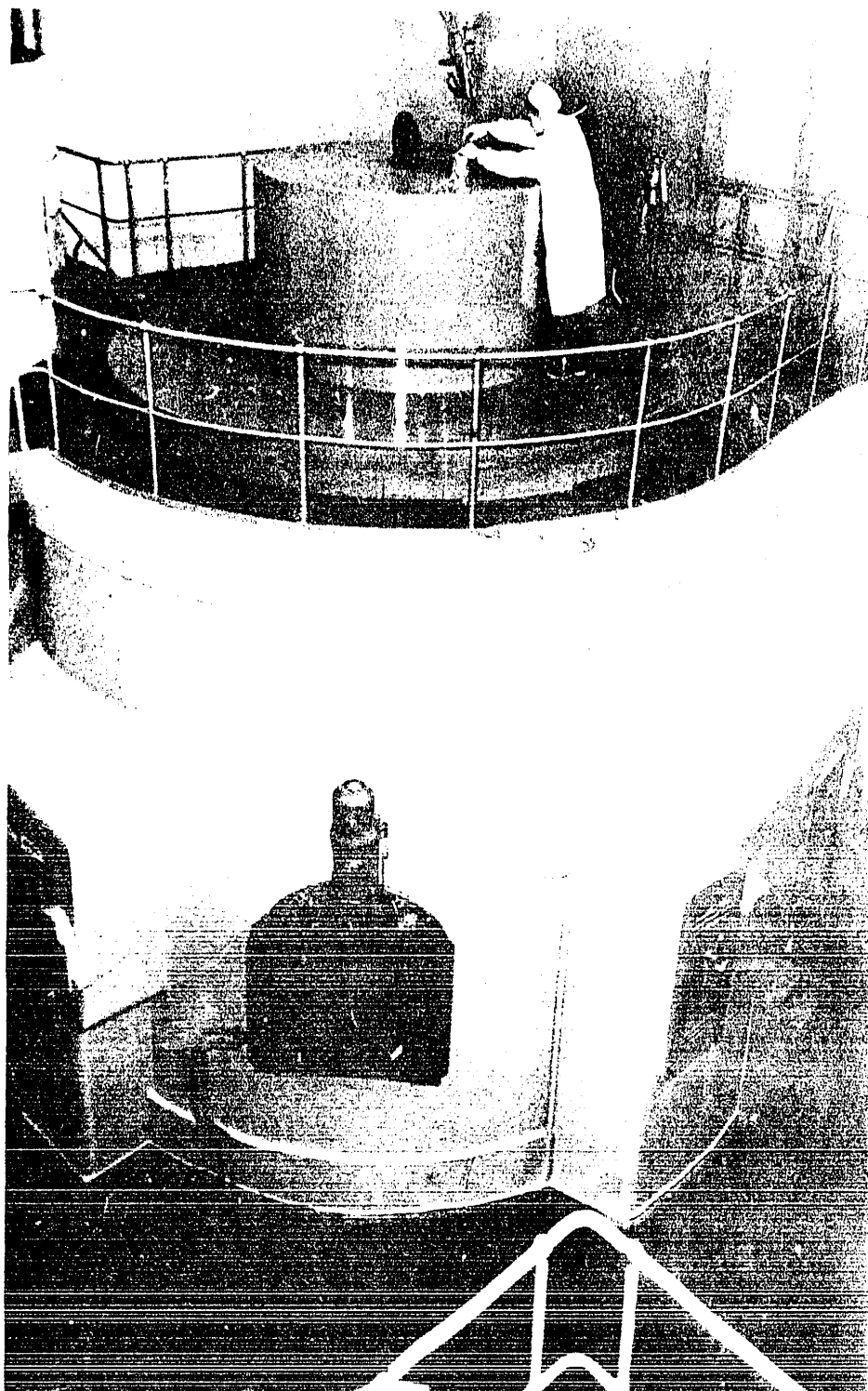


Рис. 2. Общий вид реактора РР-5

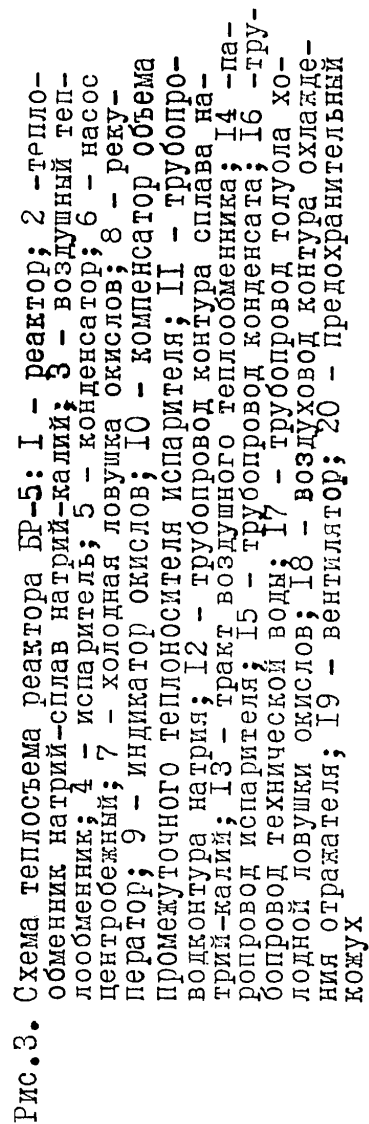


Рис. 3. Схема теплосъема реактора БР-5: I - реактор; 2 - теплообменник натрий-сплав натрий-калий; 3 - воздушный теплообменник; 4 - испаритель; 5 - конденсатор; 6 - насос центробежный; 7 - холодная ловушка окислов; 8 - рекуператор; 9 - индикатор окислов; 10 - компенсатор объема промежуточного теплоносителя испарителя; II - трубопровод контура натрия; 12 - трубопровод контура сплава натрий-калий; 13 - тракт воздушного теплообменника; 14 - паропровод испарителя; 15 - трубопровод конденсата; 16 - трубопровод технической воды; 17 - трубопровод толуола холодной ловушки окислов; 18 - воздушный контур охлаждения отражателя; 19 - вентиль; 20 - предохранительный кожух